

Juho Horto

Hukkaenergian hyödyntäminen tuotantohallissa

Opinnäytetyö
Talotekniikka

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä	Tutkinto	Aika
Juho Horto	Insinööri (AMK)	Toukokuu 2020
Opinnäytetyön nimi Hukkaenergian hyödyntäminen tuotantohallissa		40 sivua 5 liitesivua
Toimeksiantaja Sitowise Oy		
Ohjaaja Jussi Karhu Sitowise Oy Jarkko Kolehmainen XAMK		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Sitowise Oy:lle. Opinnäytetyössä tutkittiin Loval Oy:n tuotantohallissa sijaitsevan uunin jäähdytysprosessia. Uunia käytetään tuotteiden valmistuksessa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli valita parhaat mahdolliset kohteet uunista jäähdytysveteen siirtyvän energian hyödyntämistä varten Loval Oy:n tuotantohallissa. Selvittää ratkaisujen toimintaperiaatetta sekä laskea investointikustannukset ja takaisinmaksuaika.</p> <p>Hukkaenergiaa päätettiin hyödyntää ilmanvaihdon esilämmityksessä, käyttöveden lämmityksessä sekä varastoimalla hukkaenergiaa maalämpöjärjestelmän keruupiiriin. Ennen investointeja jäähdytysvettä jäähdytettiin jäähdytyskoneella. Jäähdytyskone kulutti suuren määrän energiaa, ja suurin säästö saatiin, kun hyödyntämällä hukkaenergiaa edellä mainituissa kohteissa ei jäähdytyskoneita enää tarvittu.</p> <p>Kiinteistön lämmityskulut ennen investointeja olivat 6327 € vuodessa. Lämmityskulut koostuivat kiinteistön lämmittämisestä. Kun hukkaenergiaa hyödynnettiin käyttöveden lämmityksessä, ilmanvaihdon esilämmityksessä, sekä parantamaan maalämpöpumpun hyötysuhdetta lämmityskulut olivat 2113 € vuodessa. Säästöä syntyi siis lämmityskuluissa 4214 €. Poistamalla jäähdytyskoneen tarve säästöä syntyi 26750 € vuodessa.</p> <p>Investointien kustannukset olivat 52000 €. Investointien kustannukset koostuivat työn, sekä vaadittavien laitteiden ja materiaalien hinnasta. Investointien avulla säästettiin yhteensä 31 000 € vuodessa. Takaisinmaksuajaksi saatiin 1 vuosi ja 8 kuukautta.</p> <p>Laskelmien perusteella investointi olisi kannattavaa. On kuitenkin otettava huomioon, että ei tiedetä, miten hyvin maaperä pystyy varastoimaan hukkalämpöä ja sen vaikutuksista keruupiiriin nesteen lämpötilaan, joten jäähdytyskoneita voidaan silti tarvita. Kaikkea säästöpotentiaalia ei siis välttämättä voida saavuttaa.</p>		
Asiasanat Hukkaenergia, Hukkalämpö, Energiatehokkuus, Teollisuus, Hyötykäyttö		

Author (authors)	Degree	Time
Juho Horto	Bachelor of Engineering	March 2020
Thesis title		41 pages 5 pages of appendices
Utilisation of waste energy in production hall		
Commissioned by		
Sitowise Oy		
Supervisor		
Jussi Karhu Jarkko Kolehmainen		
Abstract		
<p>This thesis was assigned by Sitowise Oy. The thesis was done to find the best solutions for the utilisation of waste energy in cooling water of industry ovens, examining the principles of solutions, count the costs of investments and payback period.</p> <p>It was decided that waste energy would be used in the pre heating of ventilation systems, heating of water and that waste energy would be stored in the ground, using a collector circuit of geothermal heating system. Before the investments, cooling water had to be cooled with a cooling device, but when the waste energy is used in the mentioned locations, it does not.</p> <p>The production hall's heating expenses were 6 327 € a year, before the investments. By utilisation of waste energy, the heating expenses were cut down to 2 113 €, so the savings in heating were 4 214 € a year. By eliminating the need for a cooling device, the savings were 26 750 € a year.</p> <p>The investments costs were 52 000 €, and altogether the savings were 31 000 € a year. The investments would pay themselves back in a year and eight months.</p> <p>The calculations show that the investments are profitable. However, it is not known how well the ground can store waste energy and what the effects on the temperature of the liquid in the collector circuit are, so a cooling device might still be needed. Some of the benefits gained by eliminating the need for a cooling device might be unreachable.</p>		
Keywords		
Waste energy, Heat loss, Energy sufficiency, Industry, Utilisation		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	PROSESSIN KUVAUS.....	7
3	MAHDOLLISET KOHTEET HUKKAENERGIAN HYÖDYNTÄMISELLE	9
3.1	Maalämpö	9
3.2	Käyttövesi	11
3.3	Ilmanvaihdon esi- tai jälkilämmitys	12
3.4	Energian myynti kaukolämpöyhtiölle	12
4	TUTKIMUSMENETELMÄT	12
4.1	Mittaukset.....	12
4.1.1	Testimittaus.....	13
4.1.2	Mittaus	14
4.2	Laskelmat ja menetelmät	17
4.2.1	Uunista jäähdytysvedeen siirtyvä energia.....	17
4.2.2	Maalämmön keruupiiri	18
4.2.3	Lämpimän käyttöveden lämmitys	19
4.2.4	Ilmanvaihdon esilämmitys.....	19
4.2.5	Jäähdytyskoneen käyttämä energia	20
4.2.6	Investointikustannukset ja takaisinmaksuaika.....	21
5	TULOKSET	21
5.1	Mittauksen tulokset.....	21
5.2	Uunista jäähdytysvedeen siirtyvä energia	23
5.2.1	Jatkuva jäähdytys.....	23
5.2.2	Pikajäähdytys.....	24
5.3	Maalämmön keruupiiri.....	25
5.4	Lämpimän käyttöveden lämmitys.....	29
5.5	Ilmanvaihdon esilämmitys	30
5.6	Jäähdytyskoneen käyttämä energia.....	33

6	TULOSTEN KÄSITTELY.....	34
6.1	Maalämmön keruupiiri.....	34
6.2	Käyttöveden lämmitys.....	35
6.3	Ilmanvaihdon esilämmitys.....	35
7	EHDOTUS HUKKAENERGIAN HYÖDYNTÄMISEEN.....	36
7.1	Investointikustannukset ja takaisinmaksuaika	37
7.1.1	Investointikustannukset.....	37
7.1.2	Takaisinmaksuaika	38
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	39
	LÄHTEET.....	41

LIITTEET

Liite 1. Pikajäähdytys kertojen tehot

Liite 2. Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden käyttämä energia

Liite 3. Ilmanvaihtokoneiden käyttämä energia esilämmityksen kanssa

Liite 4. Prosessikaavio hukkaenergian hyödyntämisestä

1 JOHDANTO

Teollisuuden tuotannossa syntyy paljon hukkalämpöä, jota voitaisiin usein hyödyntää. Usein kuitenkin ylijäämälämpö jää hyödyntämättä, ja se johdetaan ympäristöön jäähdytysvesien ja prosessikaasujen mukana. Ideaalitilanteessa hukkaenergiaa ei syntyisi ollenkaan, jos hukkaenergiaa kuitenkin syntyy, on parasta hyödyntää sitä [15]. Motivan arvion mukaan voitaisiin teollisuudessa syntyvästä ylijäämälämmöstä Suomessa hyödyntää 4TWh vuodessa. Tämä pienentäisi teollisuuden energiakustannuksia 200 miljoonalla eurolla. [2.]

Opinnäytetyö tehdään Sitowise Oy:lle, ja tutkimus suoritetaan Loval Oy:n tuotantohallissa (Kuva1). Vuonna 1960 perustettu Loval Oy on yksi Euroopan johtavista putkivastusten, lämmityselementtien ja -ratkaisujen valmistajista. Vuodesta 1995 lähtien Loval Oy on ollut osa ruotsalaista Nibe Industries -ryhmää. Opinnäytetyössä käsiteltävä tuotantohalli sijaitsee Loviisassa. Tällä hetkellä tuotantotilaa laajennetaan.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, paljonko jäähdytysprosessista syntyy energiaa ja mikä on paras mahdollinen käyttökohde jäähdytysveden sisältämän energian hyödyntämiseksi tuotantohallissa. Lisäksi tarkoituksena on selvittää parhaan ratkaisun toimintaperiaatetta, laskea sen investointikustannukset sekä selvittää taloudellinen säästö ja takaisinmaksuaika. Taloudellisen hyödyn lisäksi energiansäästö pienentää kiinteistön hiilidioksidipäästöjä.

Mikäli hukkaenergian hyödyntäminen todetaan kannattavaksi, toteutetaan toimenpiteet laajennusosassa. Sitowise Oy on suunnitellut tuotantohallin laajennusosan LVIS-ratkaisut, joten laite- ja lähtötiedot ovat helposti saatavilla.



Kuva 1. Loval Oy

2 PROSESSIN KUVAUS

Tuotannossa käytetään tuotteiden valmistukseen uuneja, joita jäähdytetään. Uunien jäähdyttämiseen on kaksi eri asetusta, jatkuva jäähdytys sekä pika-jäähdytys. Jäähdytysprosessi on esitetty kuvassa 2. Tällä hetkellä jäähdytys-veden energiaa hyödynnetään hallin lämmittämiseksi kiertoilmapuhaltimeen avulla, mutta veden alhaisen lämpötilan takia, puhallusilma on liian viileää ja tuntuu vetona, joten ratkaisu ei ole toimiva.

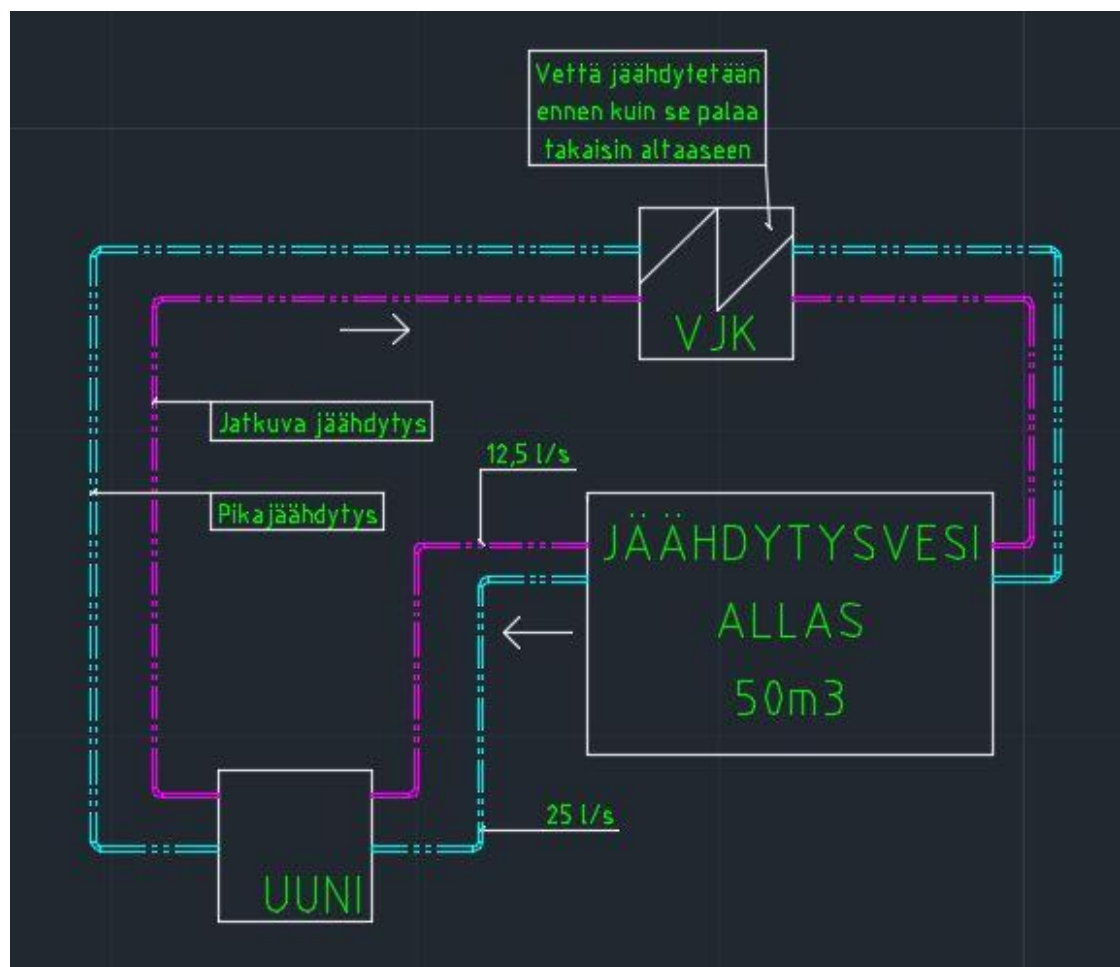
Tuotantohallissa valmistetaan pääsääntöisesti erilaisia lämmittimiä. Esimerkiksi kahvinkeitin vastuksia, jotka lämmittävät veden. Lämmittimien valmistamiseen käytetään nikkelistä ja kuparista valmistettuja osia, joita juotetaan uunissa.

Uuni pidetään 50-70°C:een lämpöisenä valmistusprosessin ulkopuolella. Juotamista varten uunin lämpötila nostetaan n. 1100°C:seen. Uuni pidetään 1100°C:ssa 10-20 minuuttia, jonka aikana juotos tapahtuu. Aika riippuu siitä, onko juotettava materiaali kuparia vai nikkeliä, ja juotettavan massan määrästä. Tämän jälkeen uunin annetaan laskea lämpötilaa luonnollisesti, ja kun

se on tipahtanut 800°C:seen, aloitetaan pikajäähdytys, jonka avulla uunin lämpötila pudotetaan takaisin 50-70°C:seen. Pikajäähdytyksen kesto on yhdestä tunnista puoleentoista tuntiin. [9.]

Yhden ”kierron” kesto on siis 6-8h riippuen juotettavasta materiaalista sekä juotettavan materiaalin määrästä. Jatkuva jäähdytys on erillisessä verkostossa pikajäähdytyksestä, ja se on käytössä koko ajan. Tuotantotilassa työskennellään kolmessa vuorossa, joten prosessi on käynnissä koko ajan.

Laajennusosaan tulee uuneja kolme kappaletta, mahdollisesti neljä. Tutkimuksessa käytettävät tiedot kerätään vanhalla puolella tapahtuvasta jäähdytysprosessista. Uudelle puolelle asennettavat uunit ja jäähdytysprosessi ovat samanlaisia tutkitun uunin kanssa (kuva 3), joten tuloksia voidaan hyödyntää uudella puolella.



Kuva 2. Jäähdytysprosessi



Kuva 3. Uuni luukun puolelta kuvattuna

3 MAHDOLLISET KOHTEET HUKKAENERGIAN HYÖDYNTÄMISELLE

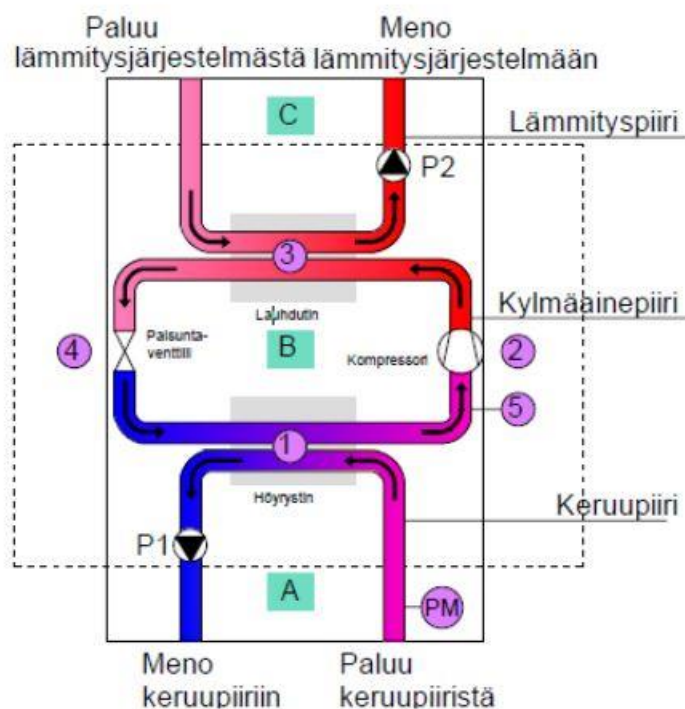
Hukkaenergiaa voidaan hyödyntää monella tapaa. Yleensä paras vaihtoehto on hyödyntää hukkaenergiaa tuotantotilassa, esimerkiksi kiinteistön lämmittämiseen. Ylijäämälämpöä voidaan käyttää myös prosessissa, kuten esimerkiksi materiaalin kuivaamiseen. Mitä lähempänä syntymäpaikkaa hukkaenergian hyödyntää, sitä vähemmän syntyy lämpöhäviöitä. Tässä kappaleessa käsitellään eri vaihtoehtoja, joissa jäähdytysprosessissa syntyvää hukkaenergiaa voidaan hyödyntää.

3.1 Maalämpö

Kiinteistössä on maalämpöjärjestelmä. Maalämpöjärjestelmässä keruupiiri kerää lämpöenergiaa maa- tai kallioperästä tai vesistöistä. Keruupiiri luovuttaa keräämänsä energian höyrystimessä kylmäainepiirille. Kylmäaine kierrätetään

kompressorin kautta lauhduttimelle, jossa kylmäaine luovuttaa energian lämmityspiiriin. (Kuva 4.) [1.]

Maalämpöjärjestelmä koostuu lämpöpumpusta, siirtoputkistosta sekä keruupiiristä. Keruupiiri voidaan asentaa porattuun reikään, maaperään tai vesistöön. Kohteen keruupiiri on asennettu porareikään. Keruuputkistoa, joka on asennettu porareikään, sekä vaadittavia kaivorakenteita kutsutaan lämpökaivoiksi tai energiakaivoiksi. Maaperän lämpötekniseen kuormitettavuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten maalaji, kosteus, sekä pohjaveden vaikutus [3, s. 26.] Kohteessa on kolme maalämpökeskusta sekä 14 lämpökaivoa, joiden syvyys on 280 m/kaivo. Maalämpökenttä on mitoitettu niin, että porakaivoista otetaan vuodessa energiaa maksimissaan 55 kWh/a aktiivista porausmetriä kohden. Kohteen laskettu vuotuinen lämpötehontarve on 250 MWh. Maalämpöjärjestelmää tuetaan tarvittaessa sähköllä. Maalämmön keruupiiriä hyödynnetään myös rakennuksen jäähdytyksessä.



Kuva 4. Kylmäaineprosessi [1.]

Laajennusosaan kuuluu tuotantohalli, sosiaalitilat sekä ruokala. Tuotantohallia lämmitetään kiertoilmapuhaltimien avulla. Lisäksi tuotantohallissa olevien liukuovien päälle asennetaan oviverhokojeet tehostamaan lämmitystä, kun ovet

ovat auki. Tavarantoimituksen yhteydessä tuotantohallin ovet saattavat olla auki pitkiä aikoja kerrallaan. IV-lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat +25/40 °C.

Sosiaali- ja ruokataloissa on käytössä lattialämmitys. Lattialämmityksessä lämmönsiirtopinta-ala on suuri, joten lämpötilan ei tarvitse olla niin suuri, kuin radiatori- ja konvektorilämmityksessä. Maalämpöjärjestelmän mitoituslämpötilat ovat +30/35°C. Tästä syystä lattialämmitys sopii hyvin maalämpöjärjestelmän lämmönjakotavaksi [4, s. 182]. Maalämpöjärjestelmässä on tukena sähkövastuksia, joilla saadaan talviaikaan kovilla pakkasilla tuotettua vaadittava lämpöteho kiinteistölle.

Uuneissa käytettävän jäähdytysveden avulla voidaan lämmittää maalämpöjärjestelmän keruupiirin meno puolta. Tällöin lämpöä ajetaan takaisin maaperään ja varastoidaan sinne. Myös keruupiirin kiertonesteen lämpötila nousee ja se parantaa pumpun vuosihyötysuhdetta. Lämpökaivo jäähtyy vuosien varrella, mutta tämä toimenpide pidentää sen ikää [3, s. 26].

Toinen vaihtoehto on lämmittää keruupiirin paluu puolta, juuri ennen lämpöpumppua. Tällöin lämpöä ei varastoidu, mutta kiertopiirin neste saadaan lämmitettyä paremmalla hyötysuhteella ja sen lämpötilan säätäminen on helpompaa.

3.2 Käyttövesi

Kiinteistön lämpimän käyttöveden valmistamiseen käytetään maalämpöpumpun tuottamaa energiaa. Vesi lämmitetään lämmönsiirtimellä, josta se siirtyy lämminvesivaraajaan. Tilassa on lisäksi lämpöakku, joka varastoi lämmintä vettä. Lämpöakussa on lämpövastukset, joilla vettä lämmitetään sähkön avulla. Akkua saatetaan tarvita, jos kylmimpinä kuukausina maalämpöjärjestelmä ei pysty tuottamaan vaadittavaa lämpötehoa kiinteistön tarpeisiin.

Uunien jäähdytysveden sisältämän energian avulla voidaan esilämmittää vettä, ennen lämmönsiirrintä. Kohteessa on 255 työntekijää, joten lämmintä käyttövettä kuluu ympäri vuoden sosiaalitiloissa sekä ruokalan keittiössä.

3.3 Ilmanvaihdon esi- tai jälkilämmitys

Ilmanvaihtokoneeseen voidaan asentaa esilämmityspatteri, jolla lämmitetään tuloilmaa. Ilmanvaihtokoneessa on tällä hetkellä lämmöntalteenotto, joka lämmittää ilmaa ennen lämmityspatteria. Jos ilmanvaihtokoneeseen lisättäisiin esilämmityspatteri, heikentäisi se lämmöntalteenoton vaikutusta.

Hukkaenergian hyödyntäminen jälkilämmityksessä ei vaikuttaisi lämmöntalteenoton toimintaan, mutta koska lämmöntalteenoton hyötysuhteet ovat erittäin hyviä ja jäähdytysveden lämpötila on matalimmillaan 25°C, saattaa pieni lämpötilaero aiheuttaa ongelmia. Kesäaikaan ilmanvaihdon lämmitykselle ei ole tarvetta.

3.4 Energian myynti kaukolämpöyhtiölle

Jos ylijäämälämpöä ei voida hyödyntää kiinteistön sisällä, voidaan energiaa myydä paikalliselle energiayhtiölle. Ylijäämälämmön lämpötila ratkaisee menetelmät ja määrän, jota energiaa voidaan siirtää. Yli 55-asteista vettä voidaan käyttää suoraan kaukolämpöverkoston paluupuolen lämmittämiseen. Jos vesi on viileämpää kuin 55 °C, tarvitaan sen lämpötilan nostamiseksi lämpöpumppu [2]. Tätä vaihtoehtoa tutkitaan vain, jos muut tavat todetaan kannattamattomiksi.

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa käydään läpi mittauksia, joita suoritettiin tutkimuksen aikana. Esitetään laskukaavat, joita tarvitaan tutkimuksessa. Sekä käydään läpi mihin tarkoitukseen laskukaavoja ja niiden avulla saatuja tuloksia käytetään.

4.1 Mittaukset

Uunista jäähdytysvedeen siirtyvän energian määrän laskemiseksi tuli selvittää jäähdytysvesien meno- ja paluupuolen lämpötilat. Lisäksi tarvitaan virtaama, joka saadaan mitoitustiedoista. Lämpötilojen mittaamiseen käytettiin GRANT:in SQ2010 dataloggeria (kuva 5). GRANT ilmoittaa loggerin virhearvoksi +/- 0,1% mitatusta arvosta [5].



Kuva 5. Grant SQ2010 -dataloggeri [5.]

4.1.1 Testimittaus

Ennen varsinaista mittausta suoritettiin testimittaus Sitowise Oy:n toimistotiloissa. Mittauksen tarkoituksena oli varmistaa loggerin toiminta sekä selvittää mahdollisia eroja mittaustuloksissa anturien välillä.

Anturit asetettiin tyhjillään olevan pöydän nurkkaan mittamaan huoneen lämpötilaa. Jokainen anturi oli samassa kohtaa. Anturi mittasi kolmen tunnin ajan ja otti lämpötilan ylös kahden minuutin välein. Testimittauksen tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Testimittauksen tulokset

pvm/aika	A1(°C)	A2(°C)	B1(°C)	B2(°C)
07.02.2020 11:57:55	21,4	21,3	21,7	21,3
07.02.2020 11:59:55	21,6	21,5	21,7	21,5
07.02.2020 12:01:55	21,7	21,7	21,8	21,7
07.02.2020 12:03:55	21,9	21,8	22,1	21,8
07.02.2020 12:05:55	22,1	21,9	22,3	22,0
07.02.2020 12:07:55	22,1	21,9	22,3	22,0
KA	21,9	21,8	22,0	21,8

Testimittauksen perusteella suurin ero antureiden välillä on keskimäärin 0,2°C:ta. Testimittauksen luotettavuuteen vaikuttivat varsin lyhyt otanta, sekä toimistotilan olosuhteet, jossa anturit saattoivat altistua häiriöille. Taulukossa on esitetty kuusi viimeisintä tulosta.

4.1.2 Mittaus

Mittausta varten tarvittiin neljä anturia, jotta pystyttiin mittaamaan meno- ja paluuveden lämpötilaa, sekä jatkuvan-, että pikajäähdytyksen verkosta. Mittausta varten neljä erillistä anturia liitettiin yhteen loggeriin. GRANT:in SQ2010 -loggerin ohjelmointia varten käytettiin Squirrel View -ohjelmaa. Ohjelman avulla määritettiin, että anturit mittaavat lämpötilaa. Aikaväliksi, jona loggeri kirjaa lämpötilan ylös, valittiin kaksi minuuttia. Ohjelman avulla anturit merkittiin koodeilla A1, A2, B1 ja B2. Lämpötiloja mitattiin 48 tunnin ajan maanantaista 10.2.2020 klo 09:00, keskiviikkoon 12.2.2020 klo 09:00.

Lämpötilaa mitattiin putkien ulkopinnoista. Menetelmä ei anna tarkkaa lämpötilaa jäähdytysvedestä, mutta koska tarkoituksena oli selvittää lämpötilaeroja meno- ja paluupuolien välillä, pystyttiin menetelmää käyttämään. Kun edellä mainitut valmistelut oli tehty, mittaus käynnistettiin liittämällä anturit loggeriin niille varatuille paikoille. Seuraavaksi antureiden päät liitettiin putkiin teipillä ja eristettiin, jotta tulokset vastaisivat mahdollisimman tarkasti putken ulkopinnan lämpötiloja. Anturijohdot olivat pituudeltaan noin neljä metriä. Anturi A1 valittiin mittamaan jatkuvan jäähdytyksen menopuolta ja anturi A2 paluupuolta. Anturi B1 mittasi pikajäähdytyksen menopuolta ja B2 paluupuolta. Kun anturit olivat liitettyinä ja eristetty, käynnistettiin loggeri. Loggerin käyntiaikaa ei tarvitse

määritellä tietokoneohjelman avulla, vaan loggeri voidaan käynnistää ja sammuttaa fyysisesti nappulaa painamalla itse loggerista.

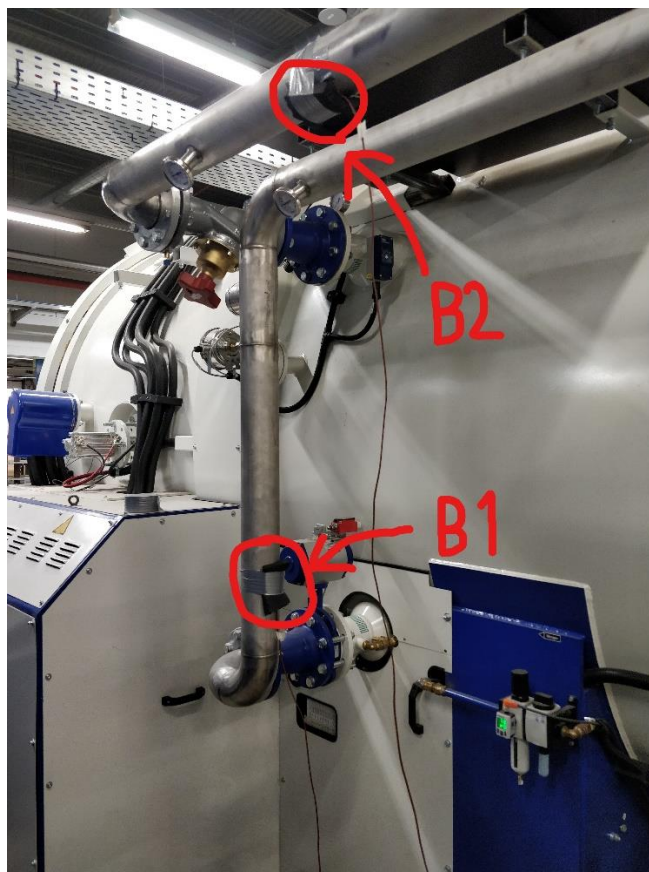
Kun loggeri oli mitannut 48 tunnin ajan, lopetettiin mittaus. Mittaustulosten purku tapahtuu samalla Squirrel View -ohjelmalla, jolla ohjelmointi suoritettiin. Ohjelman avulla saatiin mittaustulokset taulukkomuodossa Exceliin. Kuvissa 6, 7, 8 ja 9 on esitetty mittaustapaa.



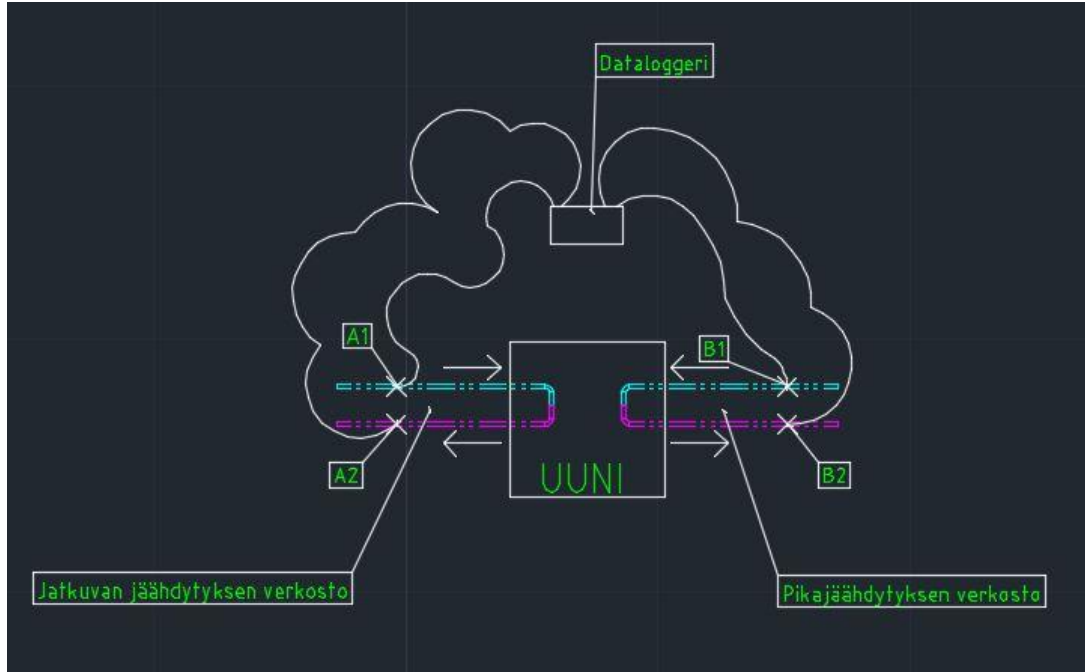
Kuva 6. Anturi liitettynä putkeen



Kuva 7. Loggerin sijainti sekä jatkuvan jäähdytyksen mittapisteet



Kuva 8. Pikajäähdytyksen mittapisteet



Kuva 9. Mittauksen periaatekuva

4.2 Laskelmat ja menetelmät

4.2.1 Uunista jäähdytysveteen siirtyvä energia

Jotta voidaan laskea uunista jäähdytysveteen siirtyvän energian määrä, tarvitsee ensin laskea teho, jolla uuni lämmittää jäähdytysvettä. Teho lasketaan kaavalla 1. Kun tiedetään tuntimäärä, jonka aikaa jäähdytysprosessi on vuodessa käynnissä, voidaan selvittää vuodessa syntyvän hukkaenergian määrä. Hukkaenergian määrä lasketaan kaavalla 2.

$$\phi = q_v \cdot Cp \cdot \Delta_t \cdot \rho \quad (1)$$

ϕ	on uunista veteen siirtynyt lämpöteho (kW)
q_v	on veden tilavuusvirta (m ³ /s)
Cp	on veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg·K)
Δ_t	on meno- ja paluuveden välinen lämpötilaero (K)
ρ	on veden tiheys (kg/m ³)

$$Q_{Jv} = \phi \cdot t \quad (2)$$

Q_{Jv}	on jäähdytysveden sisältämä energia (kWh)
t	on aika tunteina (h)
ϕ	on uunista veteen siirtynyt lämpöteho (kW)

4.2.2 Maalämmön keruupiiri

Jotta voidaan selvittää, minkälaisia vaikutuksia maalämmön keruupiirin lämmittämällä on maalämpöpumpun hyötysuhteeseen, tulee ensin selvittää, kuinka paljon keruupiirin neste lämpenee hukkaenergialla lämmitettäessä. Keruupiirin nesteen lämpötilan muutos lasketaan kaavalla 3.

$$\Delta t = \frac{\phi \cdot \eta}{c_p \cdot \rho \cdot q_v} \quad (3)$$

ϕ	on jäähdytysprosessissa syntyvä teho (kW)
η	on lämmönsiirtimeen hyötysuhde (%)
Δt	on keruunesteen lämpötilanmuutos (K)
c_p	on keruunesteen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg·K)
q_v	on keruunesteen tilavuusvirta (m ³ /s)
ρ	on keruunesteen tiheys (kg/m ³)

Kun saadaan selville, kuinka paljon lämpimämpi keruupiirin neste vaikuttaa maalämpöpumpun vuosihyötysuhteeseen, voidaan uuden vuosihyötysuhteen avulla laskea, paljonko maalämpöpumppu ottaa verkosta sähkötehoa tuottaakseen kiinteistön vaatiman lämmitystehon ja verrata sitä vanhaan arvoon. Maalämpöpumpun verkosta ottama sähköteho saadaan selville mukauttamalla kaavasta 4.

$$SPF = \frac{P_a}{P_o} \quad (4)$$

SPF on vuosilämpökerroin (kW)

P_a on pumpun antama sähköteho (kW)

P_o on pumpun verkosta ottama sähköteho (kW)

4.2.3 Lämpimän käyttöveden lämmitys

Kun tiedetään kiinteistön lämpimän käyttöveden kulutus, voidaan sen perusteella laskea virtaama ja kaavoilla 1 ja 2 selvittää, paljonko vuodessa käytetään energiaa käyttöveden lämmittämiseen. Jos tutkittavassa kohteessa ei erikseen mitata lämpimän käyttöveden kulutusta, voidaan Motivan ohjeen mukaan arvioida sen olevan 30% kohteen vedenkulutuksesta [11]. Jäähdytysveden lämpötila määrittelee, kuinka lämpimäksi käyttövettä voidaan esilämmittää. Määrätyn lämpötilan perusteella voidaan laskea, kuinka suuri osuus lämpimän käyttöveden lämmittämiseen käytetystä energiasta saadaan korvattua hukkaenergialla. Vaadittavan lämmönsiirtimen mitoitukseen käytetään myös kaavaa 1. Virtaamana käytetään käyttöveden mitoitusvirtaamaa.

4.2.4 Ilmanvaihdon esilämmitys

Ilmanvaihdon lämmityksen vuodessa käyttämä energiamäärä riippuu luonnollisesti ulkoilman lämpötilasta. Lisäksi laskennassa on huomioitava ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton vaikutus. Lämmöntalteenotto (LTO) hyödyntää rakennuksen lämmintä poistoilmaa ja lämmittää sen avulla kylmää ulkoilmaa. Ilman lämpötila LTO:n jälkeen saadaan selville kaavalla 5.

$$t_{LTO} = \eta \cdot (t_p - t_u) + t_u \quad (5)$$

t_{LTO} on ilman lämpötila LTO:n jälkeen (°C)

η on LTO:n hyötysuhde (%)

t_p on poistoilman lämpötila (°C)

t_u on ulkoilman lämpötila (°C)

Kun on saatu selville, kuinka lämmintä ilma on LTO:n jälkeen, selvitetään kaavojen 1 ja 2 avulla, kuinka paljon ilmanvaihdon lämmitys kuluttaa energiaa vuodessa. Ilman lämpötila LTO:n jälkeen selvitetään sen takia, että saadaan selville lämpötilaero, jonka avulla voidaan laskea ilmanvaihdon lämmityksen kuluttama energia.

Tutkittaessa LTO:n vaikutusta hukkaenergian hyödyntämiseen, tulee selvittää kuinka lämmintä LTO:lle saapuvan ulkoilman on oltava, jotta se pystyy lämmitämään sen vaadittuun 20 °C:seen. Tämän lämpötilan perusteella voidaan määrittää esilämmityspatteri. Vaadittu ulkoilman lämpötila lasketaan kaavalla 6.

$$t_u = \frac{t_{LTO} - \eta \cdot t_p}{-\eta + 1} \quad (6)$$

t_{LTO}	on ilman lämpötila LTO:n jälkeen (°C)
η	on LTO:n hyötysuhde (%)
t_p	on poistoilman lämpötila (°C)
t_u	on ulkoilman lämpötila (°C)

Hukkaenergiaa voidaan hyödyntää ilmanvaihdon esilämmityspattereiden avulla, eli lämmittämällä ilmaa ennen LTO:ta. Hukkaenergian määrän perusteella valitaan esilämmityspattereille teho ja niiden tehojen mukaan lasketaan, kuinka paljon esilämmityspatterit ilmaa pystyvät lämmittämään. Lämpötilamuutoksen laskemiseen käytetään kaavaa 3.

4.2.5 Jäähdytyskoneen käyttämä energia

Koska hukkaenergiaa siirrettäisiin hyötykäyttöön, ei jäähdytysvettä tarvitsisi enää jäähdyttää, joten energiaa säästyisi lisäksi veden jäähdytyskoneen käyttämän energian verran. Kun on saatu selville, paljonko energiaa voidaan hyödyntää, voidaan arvioida, paljonko vedenjäähdytyskone on kuluttanut energiaa. Vedenjäähdytyskoneella on COP-luku, joka tarkoittaa hyötysuhdetta, jolla se muuttaa verkosta ottamansa sähkötehon antotehoksi. Jäähdytysprosessin vedenjäähdytyskoneen COP-luku on 3. Esimerkiksi jos tiedetään, että

hukkaenergiaa voidaan hyödyntää 300kW, niin COP-luvun avulla voidaan laskea, että jäähdytyskone olisi joutunut ottamaan verkosta 100 kW sähkötehoa jäähdyttääkseen vettä.

4.2.6 Investointikustannukset ja takaisinmaksuaika

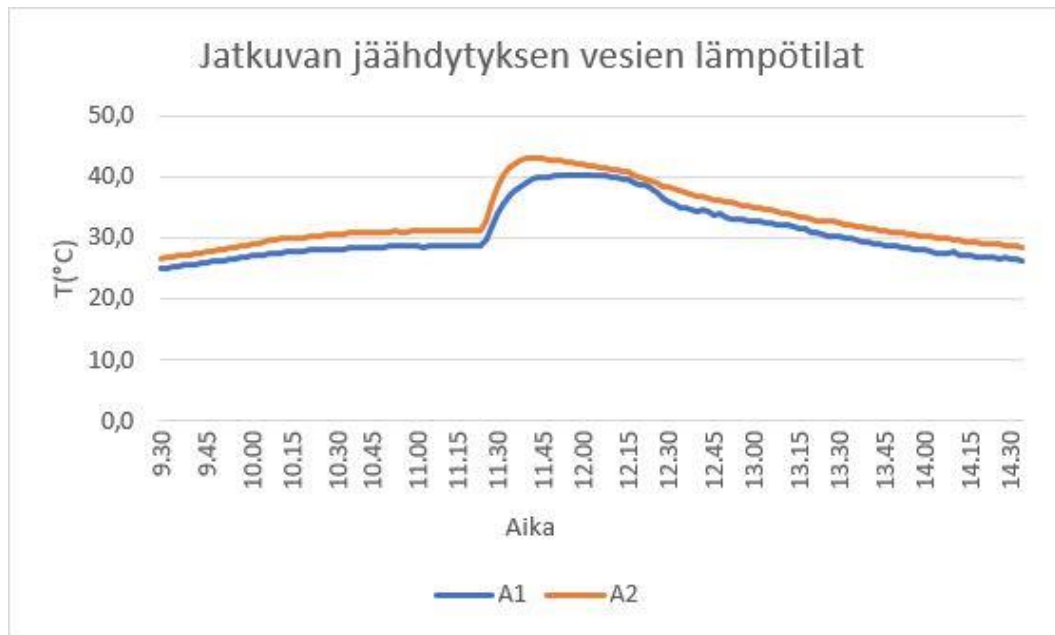
Investointikustannukset koostuvat tarvittavista materiaaleista, sekä työn määrästä. Investointikustannuksien laskennassa käytetyt luvut perustuvat Haahtelan Talonrakennuksen kustannustieto-kirjaan sekä samankaltaisesta kohteesta urakoitsijan antamaan yksikköhintaluetteloon [14]. Luettelossa on annettu yksikköhinta jokaiselle laitteelle ja materiaalille ja se sisältää laitteen asennuksen työn hinnan. Kun on saatu selville, mitä kaikkea investointeja kohde vaatii, katsotaan laitteille hinnat ja lasketaan ne yhteen.

Takaisinmaksuajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu siihen, että investoinneilla saavutetut säästöt maksavat investointikustannukset takaisin. Takaisinmaksuajan selvittämiseksi on ensin selvitettävä säästö, joka investoinneilla saavutetaan.

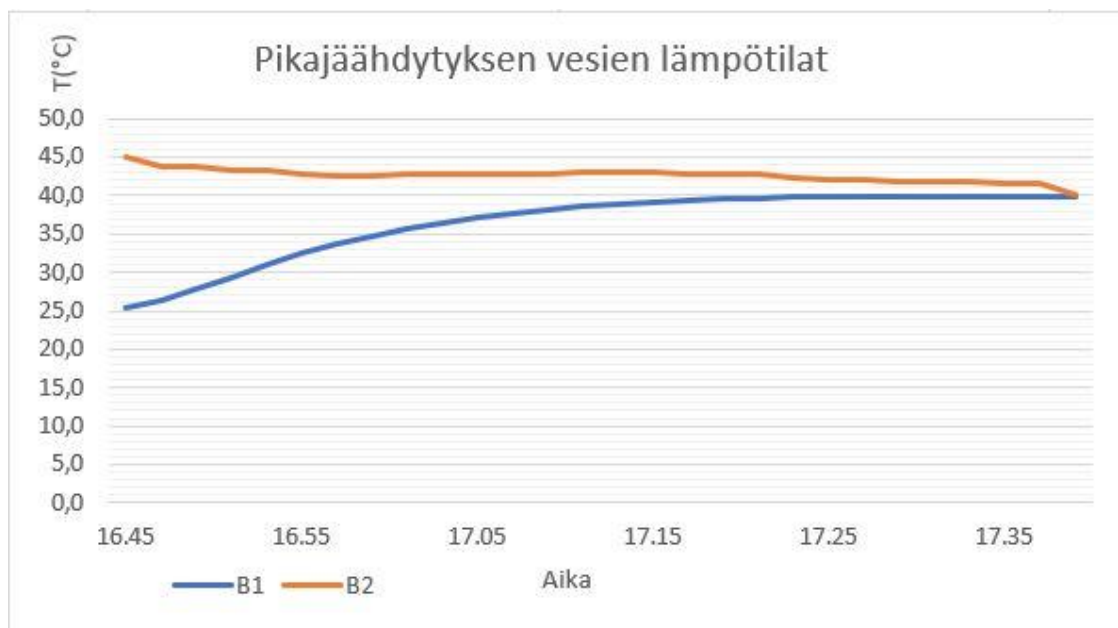
5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Mittauksen tulokset

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty lämpötilojen käyttäytyminen prosessin aikana. Kaavion tarkkailu ajankohta määriteltiin prosessin keston mukaan. Pikajäähdytyksen kaaviossa tarkasteltiin lämpötiloja yhden pikajäähdytyskerran aikana. Jatkuvan jäähdytyksen osalta on tarkasteltu yhtä ”kiertoa”, jonka aikana uuni lämmitettiin huippuunsa, materiaali juotettiin ja uuni jäähdytettiin.



Kuva 10. Jäähdytysveden meno-(A1) ja paluupuolen(A2) lämpötilat jatkuvan jäähdytyksen aikana



Kuva 11. Jäähdytysveden meno-(B1) ja paluupuolen(B2) lämpötilat pikajäähdytyksen aikana

5.2 Uunista jäähdytysvedeen siirtyvä energia

5.2.1 Jatkuva jäähdytys

Jatkuvan jäähdytyksen mittaustuloksista muodostetusta kaaviosta huomataan hyvin jäähdytysprosessin kulku (kuva 10). Jäähdytysveden menopuoli on jatkuvasti 2-3°C:tta viileämpää, kuin paluupuolen. Kuvasta huomataan myös, kun uunin lämpötilaa nostetaan, niin myös jäähdytysveden lämpötila nousee. Matalimmillaan jatkuvan jäähdytyksen menopuoli on n. 24°C:tta ja paluupuoli n. 26°C:tta. Korkeimmillaan menopuolen vesi on n. 40°C:tta ja paluupuoli n. 44°C:tta.

Uunista jäähdytysvedeen siirtyvän energiamäärän laskemiseksi käytettiin lämpötilaeron laskemiseen meno- ja paluupuolen veden lämpötilojen keskiarvoja 48 tunnin ajalta. Tilavuusvirtana on käytetty mitoitusvirtaamaa 15 m³/h (0,0042 m³/s). Mitoitusvirtaama saatiin uunin jäähdytysjärjestelmän asentajalta. Veden ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvoina on käytetty likiarvoja 4,2 kJ/kgK ja 1000 kg/m³. Likiarvoja käyttämällä tulos saadaan riittävällä tarkkuudella. Jatkuvan jäähdytyksen energiamäärä on laskettu sen mukaan, että prosessi on käynnissä 24 tuntia vuorokaudessa joka päivä vuoden ajan.

Taulukossa 2 on laskettu kaavalla 1 teho, jolla uuni lämmittää jatkuvan jäähdytyksen jäähdytysvettä. A1 on jäähdytysveden menopuolen lämpötila ja A2 paluupuolen.

Taulukko 2. Teho, jolla uuni lämmittää jatkuvan jäähdytyksen vettä

	A1(°C)	A2(°C)	$\Delta t(K)$	q_v (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	ρ (kg/m ³)
	30,5	33,1	2,6	0,004166	4,2	1000,0
$\phi(kW)=$	45,49					

Lasketun tehon perusteella voidaan laskea jatkuvassa jäähdytysprosessissa vuoden aikana syntyvä hukkaenergian määrä. Kun jäähdytys on käynnissä 24 tuntia vuorokaudessa vuoden jokaisena päivänä, saadaan tuntimääräksi 8760h. Lasketun tehon ja tuntimäärän perusteella saadaan hukkaenergian määräksi 398,52 MWh vuodessa.

5.2.2 Pikajäähdytys

Pikajäähdytysprosessia kuvataan kuvassa 11. Kuvasta huomataan, että pikajäähdytyksen käynnistyessä jäähdytysveden meno- ja paluupuolen välinen lämpötilaero on suurimmillaan. Menopuolen lämpötila on tällöin n. 25°C:tta ja paluupuolen lämpötila n. 45°C. Jäähdytysprosessin edetessä lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä pienenee, kunnes ero on enää muutama astetta.

Uunista veteen siirtyvän energian laskemisessa on tehon selvittämiseksi käytetty meno- ja paluupuolen vesien lämpötilojen keskiarvoja pikajäähdytys keran ajalta. Virtaamana on käytetty mitoitusvirtaamaa 30 m³/h (0,0083m³/s).

Mittausten aikana pikajäähdytys tapahtui seitsemän kertaa. Jokaisesta kerasta on laskettu teho, jolla uuni lämmittää jäähdytysvettä ja energiamäärän laskemista varten on käytetty tehojen keskiarvoa. Energiamäärän laskemista varten tarvittava tuntimäärä, jonka prosessi on vuoden aikana käynnissä, on laskettu tiistain 11.2.2020 perusteella. Tunnit energian laskemista varten on saatu kertomalla tiistain aika, jona pikajäähdytysprosessi oli käytössä, 365:llä. Tiistaita käytetään siksi, koska se oli mittausajankohdasta ainoa kokonainen päivä. Tiistaina pikajäähdytys oli käynnissä 232 minuutin ajan, eli vuodessa se on käynnissä 1411,3 tuntia.

Taulukossa 4 on laskettu esimerkkinä yhden pikajäähdytyskeran teho. Taulukossa 5 on esitetty pikajäähdytyskertojen kesto sekä niiden tehot. B1 on jäähdytysveden menopuolen lämpötila ja B2 paluupuolen.

Taulukko 3. Teho, jolla uuni lämmittää pikajäähdytyksen vettä

Pikajäähdytys 7	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (K)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	34,6	39,6	5,0	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	174,2303					

Taulukko 4. Pikajäähdytyskertojen kestot ja tehot

Pikajäähdytys	kesto (min)	Teho (kW)
1	40	228
2	70	161
3	52	156
4	84	150
5	82	162
6	60	159
7	48	174
	keskiarvo	170

Lasketun tehon perusteella voidaan laskea jatkuvassa jäähdytysprosessissa vuoden aikana syntyvä hukkaenergian määrä. Pikajäähdytys oli mittausten aikana käytössä 232 minuuttia päivässä, tämän perusteella tunti määräksi saadaan 1411,3 tuntia. Lasketun tehon ja tuntimäärän perusteella saadaan hukkaenergian määräksi 239,91 MWh vuodessa.

5.3 Maalämmön keruupiiri

Jatkuvan jäähdytyksen osalta kolmelta uunilta saataisiin tehoa yhteensä 135 kW. Keruupiirissä kiertävä neste on 30 % vesi/glykoliseos. Taulukossa 7 on laskettu kaavalla 3, kuinka paljon keruunesteen lämpötila nousisi lämmönsiirtimellä, jonka hyötysuhde on 90 %. Laskennassa käytetään 90% hyötysuhdetta, koska sen arvioidaan olevan mahdollisimman lähellä oikeaa lämmönsiirtimen hyötysuhdetta. Taulukossa on myös esitetty muut laskemisessa käytetyt arvot [6]. Taulukossa 8 on laskettu samalla kaavalla, paljonko keruupiirin lämpötila nousee, kun jatkuva- ja pikajäähdytys on samanaikaisesti, jokaisessa uunissa käynnissä.

Taulukko 5. Keruupiirin lämpötilan muutos jatkuvan jäähdytyksen energiaa hyödynnettäessä

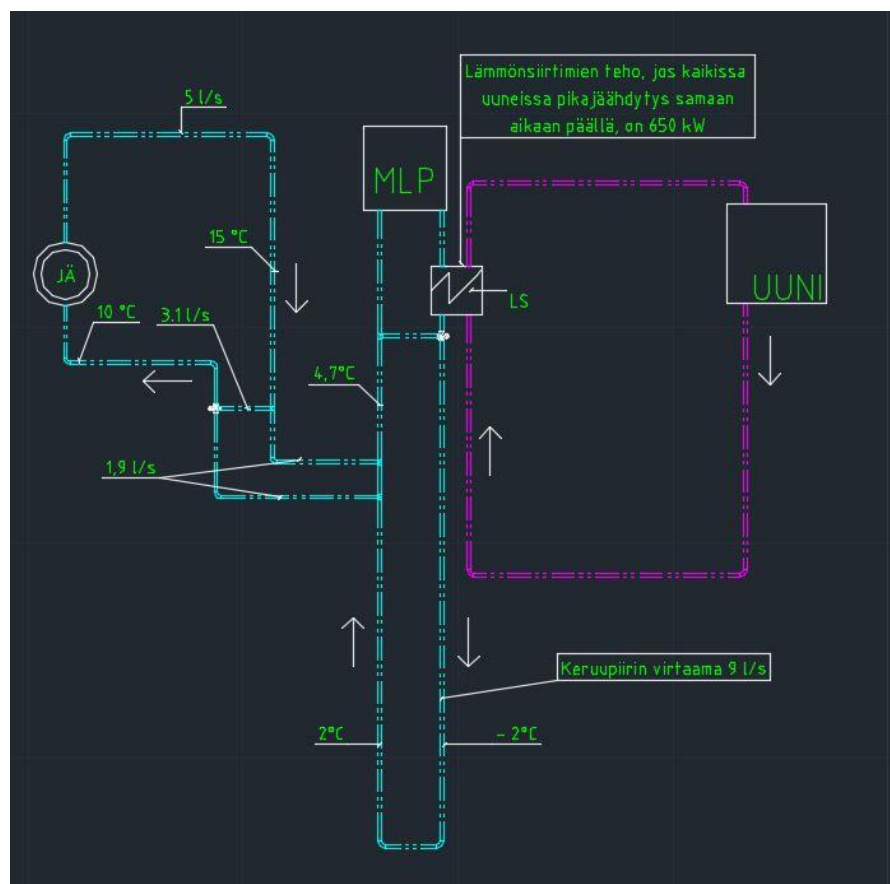
	q_v (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	ρ (kg/m ³)	ϕ (kW)	η (%)
	0,009	3,66	1033,00	136,48	90,00
Δt (K)	3,61				

Taulukko 6. Keruupiirin lämpötilan muutos, kun kaikki hukkaenergia hyödynnetään

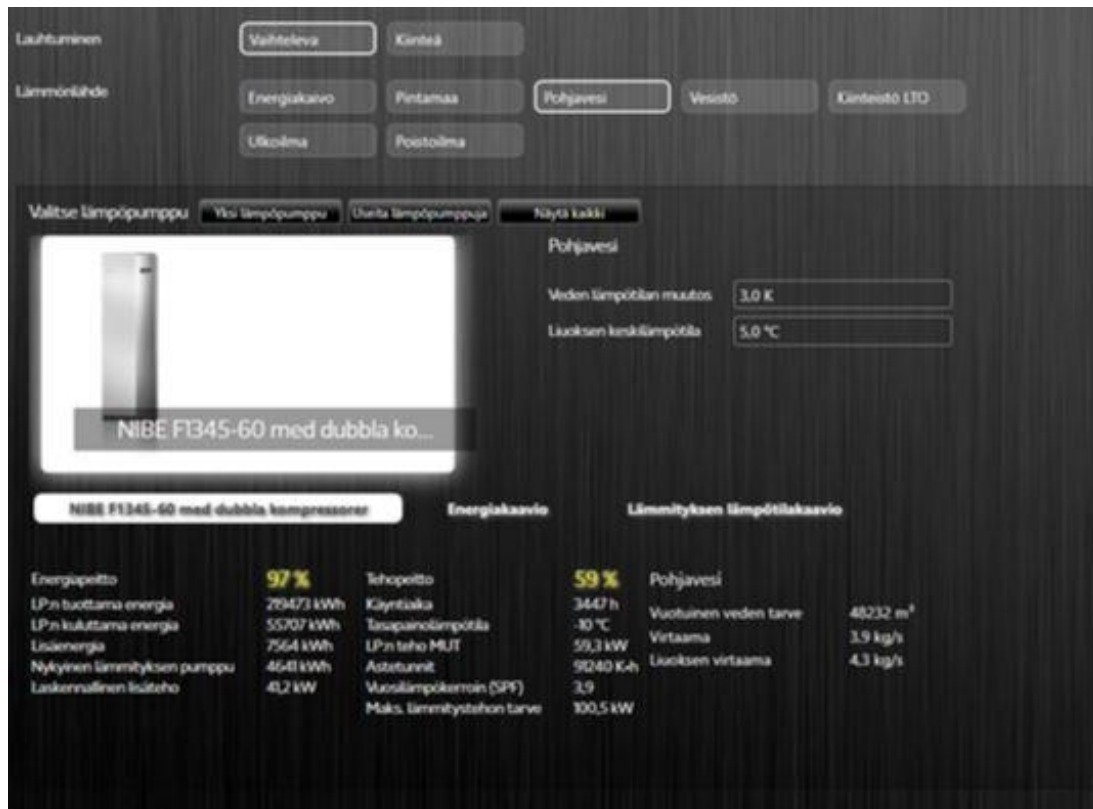
	q_v (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	ρ (kg/m ³)	ϕ (kW)	η (%)
	0,009	3,66	1033,00	646,44	90,00
Δt (K)	17,10				

Kesäaikaan keruupiiristä nouseva nesteen lämpötila saisi olla maksimissaan 10 °C, koska maalämmön keruupiiriä hyödynnetään kiinteistön jäähdytyksessä. Jäähdytyksen myötä saataisiin lämpöpumpulle menevän nesteen lämpötilaksi 15 °C. Tällä hetkellä jäähdytyksen ollessa päällä keruupiirin neste on lämpimillään 4,7 °C. Talviaikaan, kun jäähdytys ei ole käytössä, on nesteen lämpötila 2°C. Lämpöpumpulle menevän nesteen lämpötilaa saataisiin siis nostettua kesäisin 10,3 °C:ta. Talviaikaan, kun jäähdytys ei ole käytössä, voidaan lämpöpumpulle tuoda niin lämmintä kiertonestettä kuin mahdollista, kunhan se ei ylitä 30 °C. Kuvassa 12 on yksinkertaistettu prosessikuva nykytilanteesta.

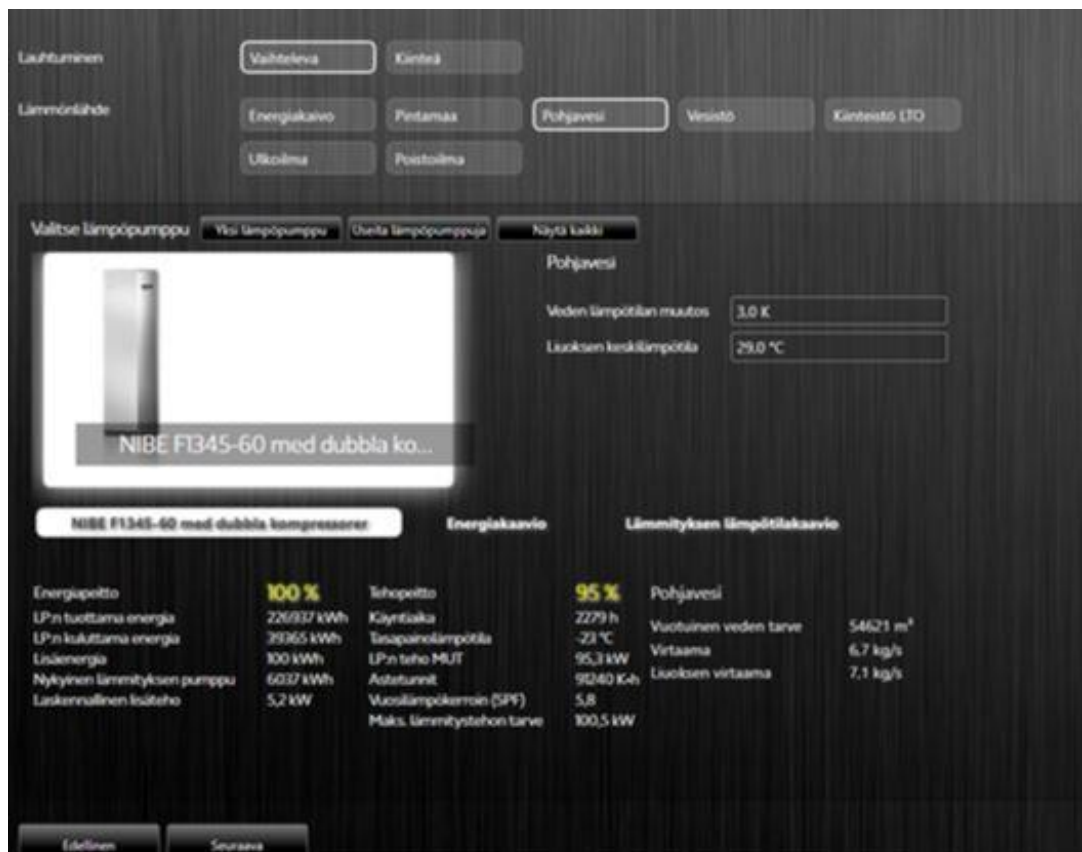
Ihanteellinen tilanne on siis, että kesäkuukausina pumpulle tuodaan 15 °C:sta keruupiirin nestettä ja talvikuukausina 29 °C:sta. Kuvissa 13 ja 14 on Niben DIM-ohjelmalla simuloitu maalämpöpumppujen toiminta-arvot keruupiirin eri lämpötilojen mukaan.



Kuva 12. Prosessikuva nykytilanteesta, kun hukkalämpöä ei hyödynnetä



Kuva 13. MLP:n toiminta keruupiiriliuoksen ollessa 5°C



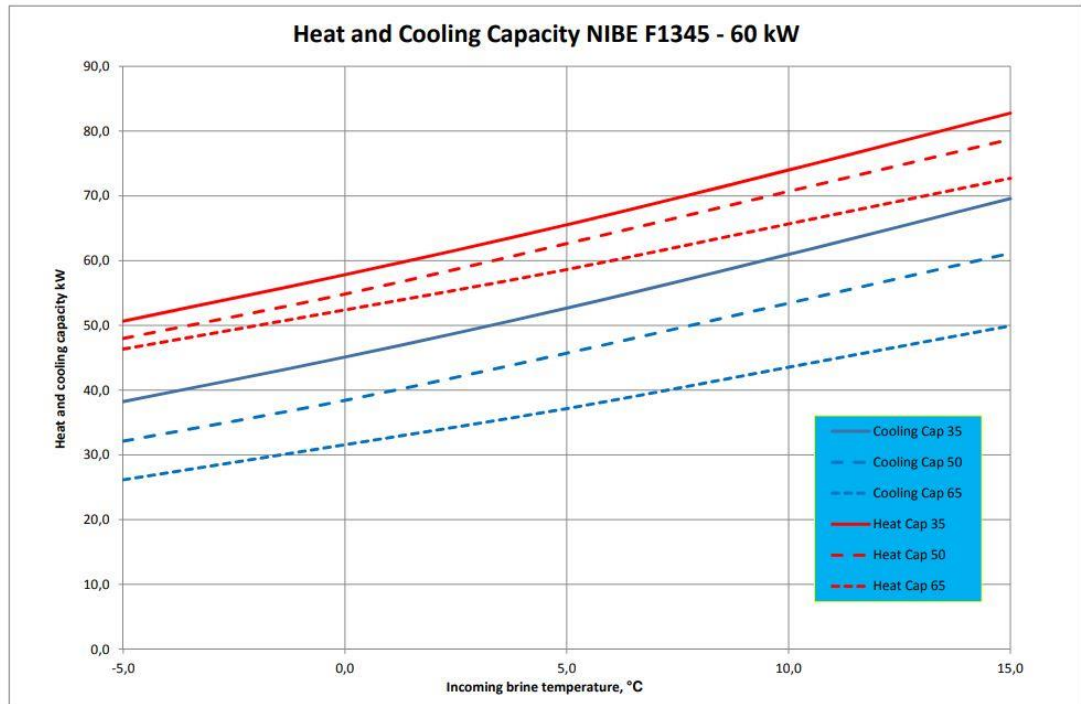
Kuva 14. MLP:n toiminta keruupiiriliuoksen ollessa 29°C

Koska vuosilämpökertoimen muutos on suoraan suhteessa nesteen lämpötilaan (kuva 15), voidaan vuosilämpökerroin lukujen perusteella laskea, että 15-asteisen keruupiirinesteen lämpötilalla pumpun SPF-luku olisi 4,7. Jotta tiedettäisiin lopullinen maalämpöpumppujen vuodessa kuluttama energia, täytyy vuosittainen lämpötehtäjä jakaa SPF-luvulla (kaava 4). Koska kesäaikaan käytössä on eri SPF-luku, käytetään kolmasosan laskemiseen SPF-lukua 4,7 ja loput lasketaan luvulla 5,8. Vuotuisena lämpötehtäjä käytetään kuvan 11 LP:n tuottamaa energiaa. Pumpun paremmilla vuosihyötysuhteilla laskettu vuotuinen ottoteho on laskettu taulukossa 9. Todellisuudessa kesäaikaan ei käytetä yhtä paljon energiaa lämmittämiseen, joten oikeasti suurempi osuus vaadittavasta lämpötehosta laskettaisiin paremmalla SPF-luvulla.

Taulukko 7. Pumpun verkosta ottama sähköteho paremmilla SPF-luvuilla

P_a (kWh)	SPF	P_o (kWh)
75645,7	4,7	16094,8
151291,3	5,8	26084,7
	yht.	42179,5

Aikaisemmin lämpöpumput kuluttivat vuodessa 55707 kWh energiaa. Laskujen perusteella, kun uunin jäähdytysveden sisältämää energiaa hyödynnettäisiin, kuluttaisivat lämpöpumput 42180 kWh energiaa. Lisäksi aikaisemmin, kun ilman lämpötila oli kylmimmillään, eivät lämpöpumput pystyneet kattamaan koko lämpötehtäjä, vaan ne tarvitsivat lisäenergiaa 7564 kWh:n verran. Kun talviaikaan keruupiirin nesteen lämpötila on 29°C, tarvitsee se lisäenergiaa vain 100 kWh. Lisäenergia on suoraa sähköenergiaa. Jos uunien jäähdytysvesien sisältämää energiaa hyödynnettäisiin lämmityksessä, säästettäisiin vuodessa melkein 21 MWh.



Kuva 15. MLP:n antama sähköteho keruupiirinliuoksen lämpötilan mukaan

5.4 Lämpimän käyttöveden lämmitys

Kohteessa ei ole mitattu lämpimän käyttöveden kulutusta, joten se on arvioitava vuotuisen vedenkulutuksen mukaan. Motivan mukaan voidaan olettaa, että lämpimän käyttöveden osuus käytetystä vedestä on 30 % [11]. Tuotantohallissa ja sen muissa tiloissa, kuluu yhteensä n. 3000 m³ vettä vuodessa, eli lämmintä vettä kuluisi tällöin 900 m³. Vanhalta puolelta laajennusosaan siirtyä tuotanto, sosiaalitilat sekä keittiö, joten voidaan olettaa, että vedenkulutus pysyy suunnilleen samana. Taulukossa 10 on laskettu kaavoilla 1 ja 2, kuinka paljon laitoksessa kuluu vuodessa energiaa lämpimän käyttöveden lämmittämiseen.

Taulukko 8. LKV:n lämmittämiseen käytetty energia vuodessa

$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{l/s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\phi(\text{kW})$	tunnit(h)	$Q_{kv}(\text{kWh})$
50	0,0285	4,2	1000	5,993	8760	52500

Lämmönsiirrintä mitoitettaessa ensiöpuolen paluulämpötila saa olla enintään 3 °C korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila, joten käyttöveden lämpötilaksi siirtimen jälkeen määräytyy 21 °C [12]. Koska verkostosta tulevan veden lämpötila vaihtelee 5 °C ja 10 °C välillä, käytetään laskennassa lämpötilaa 7,5 °C.

Taulukko 9. Vuodessa säästettävä energiamäärä

$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{l/s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\phi(\text{kW})$	tunnit(h)	$Q_{\text{kv}}(\text{kWh})$
13,5	0,0285	4,2	1000	1,618	8760	14175

Taulukossa 11 on laskettu, paljonko esilämmittämällä vesi 21 °C:seen säästetään energiaa vuodessa. Lämmönsiirrin tulee mitoittaa putken virtaaman mukaan, joka on 1,06 l/s. Lämmönsiirtimen mitoitus-teho on laskettu taulukossa 12.

Taulukko 10. Käyttöveden lämmönsiirtimen teho

$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{l/s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\phi(\text{kW})$
13,5	1,0600	4,2	1000	60,102

5.5 Ilmanvaihdon esilämmitys

Laajennusosaa palvelee neljä ilmanvaihtokonetta. Uunien jäähdytysvesien matalien lämpötilojen takia ei ulkoilmaa ole mahdollista lämmittää kuin 20°C:seen. Taulukossa 13 on esitetty kullekin esilämmityspatterille mitoitus-teho. Loviisa kuuluu ensimmäiseen säävyöhykkeeseen, joten mitoittavana ulkoilman lämpötilana on käytetty -26 °C.

Taulukko 11. Esilämmityspattereiden tehot

3TK1	$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	46	4,8	1	1,2
$\phi(\text{kW})$	265,0			
3TK2	$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	46	0,9	1	1,2
$\phi(\text{kW})$	49,7			
3TK3	$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	46	1,5	1	1,2
$\phi(\text{kW})$	82,8			
3TK4	$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	46	1,2	1	1,2
$\phi(\text{kW})$	66,2			

Jotta saataisiin selville, paljonko ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterit kuluttavat energiaa vuodessa, on selvítettävä, kuinka lämmintä ilma on lämmöntalteenoton jälkeen kaavalla 5. Ulkoilman lämpötiloina on käytetty kuukauden keskilämpötiloja [10].

Taulukossa 14 on esitetty yhden ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin vuodessa käyttämä energia. Laskemisessa on käytetty kaavoja 1, 2 ja 5. Taulukon perusteella voidaan todeta, että ulkoilman lämpötilan ollessa 10,8 astetta lämmityspatterille ei ole enää tarvetta, vaan lämmöntalteenotto voi hoitaa loput lämmityksestä. Tämän perusteella ilmaa ei tarvitsisi esilämmittää 20 asteeseen, vaan 10,8 astetta riittäisi. Jos hukkaenergiaa voitaisiin hyödyntää jälkilämmityksessä, voitaisiin jäähdytysveden sisältämällä energialla korvata ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden käyttämä energia kokonaan.

Taulukko 12. 3TK1:n lämmityspatterin käyttämä energia

3TK1	$\eta(\%)$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$t_u(^{\circ}\text{C})$	$t_{LTO(^{\circ}\text{C})}$	$t_s(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{kJ}/\text{kgK})$	$\phi(\text{kW})$	$t(\text{h})$	$Q(\text{kWh})$
Tammikuu	82,30	22,00	-4,00	17,40	20,00	4,80	1,20	1,00	14,99	744,00	11150,71
Helmikuu	82,30	22,00	-4,50	17,31	20,00	4,80	1,20	1,00	15,50	672,00	10414,17
Maaliskuu	82,30	22,00	-2,60	17,65	20,00	4,80	1,20	1,00	13,56	744,00	10088,78
Huhtikuu	82,30	22,00	4,50	18,90	20,00	4,80	1,20	1,00	6,32	720,00	4551,55
Toukokuu	82,30	22,00	10,80	20,02	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Kesäkuu	82,30	22,00	14,20	20,62	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Heinäkuu	82,30	22,00	17,30	21,17	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Elokuu	82,30	22,00	16,10	20,96	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Syyskuu	82,30	22,00	10,50	19,96	20,00	4,80	1,20	1,00	0,20	720,00	147,23
Lokakuu	82,30	22,00	6,20	19,20	20,00	4,80	1,20	1,00	4,59	744,00	3413,78
Marraskuu	82,30	22,00	0,50	18,19	20,00	4,80	1,20	1,00	10,40	720,00	7487,77
Joulukuu	82,30	22,00	-2,20	17,72	20,00	4,80	1,20	1,00	13,15	744,00	9785,37
										yht.	57039,37

Samalla periaatteella laskettuna jokaisen ilmanvaihtokoneen lämmityspattereiden vuodessa kuluttama energia on yhteensä 124794,8 kWh. Ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterit ovat vesikiertoisia, ja ne on liitetty maalämpöön.

On kuitenkin huomioitava, että kovilla pakkasilla vaadittavat tehot ilman lämmittämiseen ovat suuria, joten silloin tarvitaan myös ilmanvaihtokoneen lämmityspattereita. Esilämmitys vaikuttaa myös LTO:n toimintaan.

Energiaa voitaisiin hyödyntää myös jälkilämmityspatterissa, eli patteri sijoitettaisiin vasta LTO:n jälkeen, mutta koska käytössä ei ole suurta lämpötilaeroa

ja virtaamat ovat erittäin suuria, vaadittaisiin syvä lämmityspatteri, jossa on liian suuret painehäviöt.

Lämmityspatterit tulee mitoittaa pienimmän jatkuvasti saatavilla olevan tehon mukaan, eli laskennassa käytetään jatkuvassa jäähdytyksessä syntyvää tehon määrää. Jatkuvassa jäähdytyksessä syntyy tehoa yhteensä 136.5 kW. Yhdelle ilmanvaihtokoneelle olisi siis esilämmitystä varten tehoa käytössä yli 34 kW.

Jos hukkaenergiaa voitaisiin hyödyntää lämmittämällä ilmaa LTO:n jälkeen, taulukon 15 perusteella voitaisiin todeta, että 34 kW lämmityspatterin avulla voidaan korvata ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterit kokonaan, mutta jälkilämmitystä ei voida toteuttaa, joten täytyy tutkia, kuinka ilman esilämmittäminen vaikuttaa LTO:n toimintaan. Laskelmissa ei ole huomioitu tilanteita, kun lämpötila alittaa kuukauden keskiarvon. Eli vaikka helmikuun keskilämpötila on $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, saattaa lämpötila silti laskea sen alle. Taulukossa 15 on laskettu kaavalla 6, kuinka lämmintä lämmöntalteenotolle tulevan ilman tulisi olla, jotta se pystyisi lämmittämään ilman 20°C :een. Seuraavaksi tutkittiin, paljonko esilämmityspatteri 34 kW teholla pystyy lämmittämään ulkoilmaa. Laskelmat on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 13. Vaadittava lämmöntalteenotolle tulevan ilman lämpötila

3TK1	$t_{\text{LTO}}(^{\circ}\text{C})$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$\eta(\%)$
	20	22	82,3
$t_v(^{\circ}\text{C})$	10,70		

Taulukko 14. Ilman lämpötilamuutos

3TK1	$\phi(\text{kW})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	34,12	4,80	1,00	1,20
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	5,92			

Ilmanvaihtokoneen tuloilmavirta on niin suuri, että lämpötilaa ei saada nostettua kuin 5,92 astetta. Koska muissa koneissa on pienempi ilmavirta, voidaan 3TK1:n esilämmityspatteriin mitoittaa suurempi teho ja muihin pienempi. Taulukossa 17 on esitetty, paljonko esilämmityspatteri määrättyillä tehoilla nostaa ulkoilman lämpötilaa ja taulukossa 18 on esitetty, paljonko ilmanvaihtokone 3TK1 käyttää esilämmityspatterin toimiessa vuodessa lämmitysenergiaa.

Taulukko 15. Ilman lämpötilamuutokset

3TK1	$\phi(\text{kW})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	81,12	4,80	1,00	1,20
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	14,08			
3TK2	$\phi(\text{kW})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	15,12	0,90	1,00	1,20
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	14,00			
3TK3	$\phi(\text{kW})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	25,12	1,50	1,00	1,20
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	13,95			
3TK4	$\phi(\text{kW})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
	15,12	1,20	1,00	1,20
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	10,50			

Taulukko 16. 3TK1:en vuodessa käyttämä energia hukkaenergiaa hyödynnettäessä

3TK1	$\eta(\%)$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$t_u(^{\circ}\text{C})$	$t_{ep}(^{\circ}\text{C})$	$t_{to}(^{\circ}\text{C})$	$t_s(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\phi(\text{kW})$	$t(\text{h})$	$Q(\text{kWh})$
Tammikuu	82,30	22,00	-4,00	10,08	19,89	20,00	4,80	1,20	1,00	0,63	744,00	470,71
Helmi	82,30	22,00	-4,50	9,58	19,80	20,00	4,80	1,20	1,00	1,14	672,00	767,72
Maaliskuu	82,30	22,00	-2,60	11,48	20,14	20,00	4,80	1,20	1,00		744,00	
Huhtikuu	82,30	22,00	4,50	18,58	21,39	20,00	4,80	1,20	1,00		720,00	
Toukokuu	82,30	22,00	10,80	24,88	22,51	20,00	4,80	1,20	1,00	-	744,00	-
Kesäkuu	82,30	22,00	14,20	28,28	23,11	20,00	4,80	1,20	1,00	-	720,00	-
Heinäkuu	82,30	22,00	17,30	31,38	23,66	20,00	4,80	1,20	1,00	-	744,00	-
Elokuu	82,30	22,00	16,10	30,18	23,45	20,00	4,80	1,20	1,00	-	744,00	-
Syyskuu	82,30	22,00	10,50	24,58	22,46	20,00	4,80	1,20	1,00		720,00	
Lokakuu	82,30	22,00	6,20	20,28	21,70	20,00	4,80	1,20	1,00		744,00	
Marraskuu	82,30	22,00	0,50	14,58	20,69	20,00	4,80	1,20	1,00		720,00	
Joulukuu	82,30	22,00	-2,20	11,88	20,21	20,00	4,80	1,20	1,00		744,00	
										yht.		1238,43

Kun aikaisemmin ilmanvaihdossa lämmittämiseen käytettiin 124,8 MWh, niin esilämmityspattereiden kanssa vuodessa kuluisi 11,2 MWh. Laskuissa ei ole otettu huomioon ajankohtia, jolloin lämpötila alittaa kuukauden keskilämpötilan, joten todellisuudessa säästöä ei synny noin paljoa.

5.6 Jäähdytyskoneen käyttämä energia

Kun ulkoilman lämpötila on alle 10°C , jäähdytetään uunien jäähdytysvettä vapaajäähdytyksellä. Kun ulkoilma on yli 10°C , jäähdytetään vesi jäähdytyskoneella. Koska tiedetään teho, jolla uuni lämmittää jäähdytysvettä, ja aika, jona ulkoilman lämpötila on yli 10°C , voidaan arvioida, paljonko jäähdytyskone kuluttaa vuodessa energiaa. Laskelmat on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 17. Jäähdytyskoneen käyttämä energia vuodessa

	ϕ (kW)	t(h)	COP_{jk}	Q(kWh)
Pikajäähdytys	510	591,6	3	100572
Jatkuva jäähdytys	136,5	3672	3	167076
			yht.	267648

Jäähdytyskoneen COP-luku (Coefficient Of Performance) tarkoittaa hyötysuhdetta, jolla verkosta otettu sähköteho muuttuu antotehoksi. Taulukossa esitetyt tunnit on otettu kuukausien keskilämpötilojen perusteella.

6 TULOSTEN POHDINTA

6.1 Maalämmön keruupiiri

Kun hukkaenergiaa käytetään maalämpöjärjestelmän keruupiirin nesteen lämmittämiseen, saadaan suuri hyöty. Hukkalämpö varastoituu maaperään ja pidentää lämpökaivojen ikää sekä samalla parantaa maalämpöpumpun hyötysuhdetta.

Riskinä on keruupiirin nesteen liiallinen lämpeneminen kesäaikaan. Kesällä maalämmön keruupiiriä hyödynnetään kiinteistön jäähdytyksessä, joten nesteen maksimilämpötila kesäaikaan saa olla 10°C. Kohteessa olevat maalämpöpumput ovat Nibe Oy:n F1345-pumppuja. Keruupiirin paluupuolen nesteen maksimilämpötila on 30°C. Jos tämä lämpötila saavutetaan, menee pumppu häiriötilaan ja lakkaa toimimasta. [7.]

Ajettaessa lämpöä maaperään ja sen vaikutuksista keruupiirin nesteen lämpötilaan ei ole tarkkaa tietoa, joten se vaatisi tarkempia tutkimuksia. Laskelmien sekä Rototec Oy:n Niko Pihlasen kanssa käydyn puhelinkeskustelun perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että keruupiirin nestettä lämmitettäessä 135 kW teholla, joka saadaan pelkästään jatkuvasta jäähdytyksestä, lämpötila nousisi ainakin 20 °C:seen, todennäköisesti jopa tämän yli. [8.] Tämän takia järjestelmässä tulee ottaa huomioon mahdollinen ylikämmeneminen.

Paras vaihtoehto on pitää kesäaikaan keruupiirin nesteen lämpötila 10 °C:ssa kiinteistön jäähdyttämisen takia. Kun jäähdytystä ei enää syksyllä tarvita, voidaan aloittaa keruupiirin nesteen lämpötilan nostaminen, jotta talvella, kun lämmitystä eniten tarvitaan, saadaan lämpöä tuotettua mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Keväällä lopetettaisiin hukkaenergian siirtäminen keruupiiriin, jotta kesään mennessä nesteen lämpötila olisi 10 °C. Kun lämpötila on pudonnut 10 °C:een, hukkaenergian avulla se pidetään siinä.

Ongelmana on, että ei tiedetä, kuinka paljon maaperään varastoitunut lämpöenergia lämmittää keruupiirin nestettä kesäaikaan. Jotta saataisiin tietää tarkemmin, kuinka paljon keruupiirin nesteen lämpötila nousee, ja lämmön varastoinnin vaikutuksista maaperään, tulisi suorittaa jatkotutkimuksia.

Jos keruupiirin nesteen lämpötila nousee yli 10 °C:een, tulee jäähdytys hoitaa muulla tapaa ja 29 °C:een ylittymisen varalta tulisi ennen lämpöpumppua sijoittaa varatoimenpiteenä jäähdytyskone.

6.2 Käyttöveden lämmitys

Käyttöveden lämmittäminen hukkaenergian avulla vaatisi 60 kW lämmönsiirtimen. Toinen vaihtoehto on hoitaa esilämmitys varaajasäiliöllä, jolloin tehon ei tarvitse olla yhtä suuri, mutta silloin riskinä on legionella-bakteerin muodostuminen [13]. Käyttöveden esilämmittämisestä saatava hyöty 14,2 MWh on hukkaenergian käyttökohteista pienin.

6.3 Ilmanvaihdon esilämmitys

Hyödyntämällä hukkaenergiaa ilmanvaihdon esilämmityksessä saadaan suurin hyöty. Jotta saataisiin selville tarkemmin, paljonko esilämmityksellä on mahdollista säästää energiaa, tulisi suorittaa simulointi esimerkiksi IDA ICE -ohjelmalla. Kuukausien keskilämpötilojen perusteella laskettu säästö on kuitenkin riittävän tarkka.

Laskelmien perusteella hukkaenergian hyödyntäminen ilmanvaihtokoneiden esilämmityksessä olisi kaikkein kannattavin vaihtoehto, koska sillä saavutetaan yli 100 MWh:n säästö vuodessa. Koska teollisuushallissa on niin suuret ilmavirrat, vie ilmanvaihto yli puolet kiinteistön lämpötehotarpeesta.

Ilmanvaihdon esilämmityksen toteuttaminen on myös kaikkein haastavinta. Jäähdytysvedessä ei ole käytössä suurta lämpötilaeroa, mutta virtaama on suuri. Tämän takia on haastavaa löytää tarkoitukseen sopivaa esilämmityspatteria.

Ongelmia saattaa tuottaa myös esilämmityspattereiden sijoittaminen ilmanvaihtokoneisiin. Esilämmityspatterit ovat kooltaan suuria, joten asennusta varten ilmanvaihtokoneita tulisi siirtää. Eli ongelmaksi saattaa tulla, että esilämmityspattereille ei ole tilaa. Suunnitelmien perusteella IV-konehuoneessa olisi tilaa siirtää IV-koneita. On otettava huomioon myös jäätymisen riski. Jos ulkona on kova pakkanen ja jostain syystä uunit pysäytetään, esilämmityspatteri jäätyy.

7 EHDOTUS HUKKAENERGIAN HYÖDYNTÄMISEEN

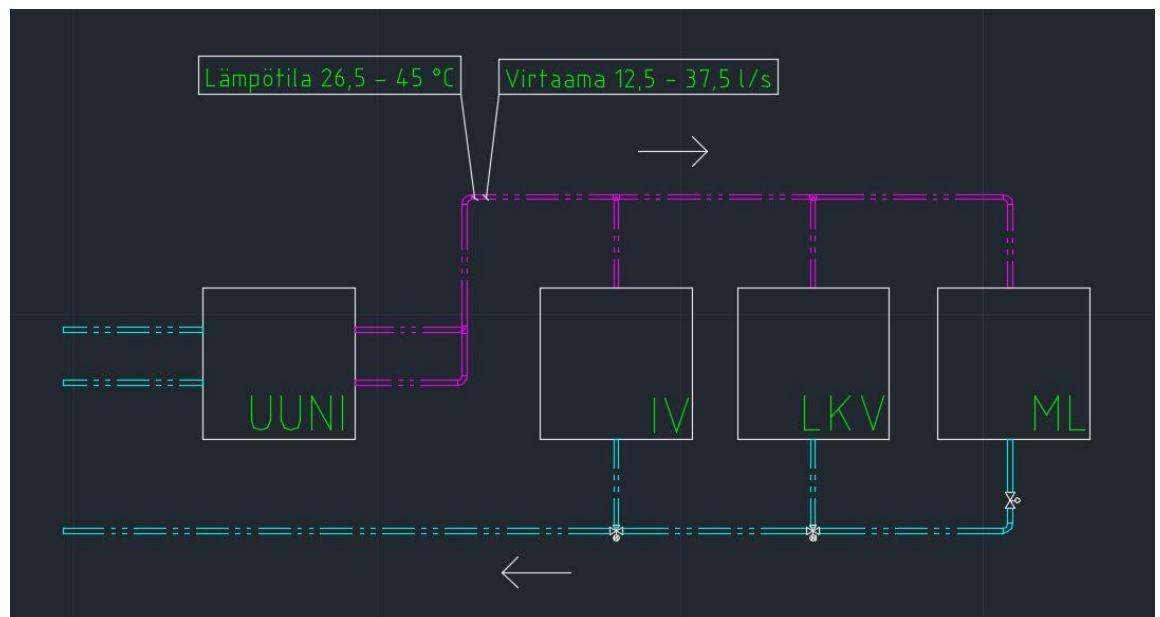
Paras vaihtoehto on hyödyntää uuneista syntyvää hukkaenergiaa aina tarpeen mukaan kaikissa käsitellyissä kohteissa. Talvella, kun ilmaa tulee lämmittää, suurin osa hukkaenergiasta hyödynnetään ilmanvaihdon esilämmityksessä.

Käyttöveden lämmitystä varten asennetaan varaajasäiliö. Käyttövesi esilämmitetään varaajasäiliössä 21 °C:seen ja automaation avulla se pidetään siinä. Eli aina kun käyttöveden lämpötila säiliössä tippuu esimerkiksi 18 °C:seen, ohjataan hukkaenergiaa lämmittämään käyttövettä takaisin 21 °C:seen.

Maalämmön keruupiiriin hukkaenergiaa ohjataan, kun sitä jää muista tarpeista yli. Hukkaenergian siirtoa säädellään keruupiirin lämpötilan mukaan. Kesällä keruupiirin paluupuoli pyritään pitämään 10 °C:na, jotta jäähdytyksen vaikutuk-

sesta maalämpöpumpulle menevä keruupiirin neste olisi 15 °C. Syksyllä asetusarvoa muutetaan ja keruupiirin nestettä lämmitetään niin lämpimäksi kuin mahdollista, kuitenkin maksimissaan 29°C:seen.

Jatkuvan- ja pikajäähdytyksen verkostot yhdistetään, joka on jo pelkästään investointikustannusten takia järkevää. Yksinkertaistettu prosessi on esitetty kuvassa 16. Liitteessä 4 on esitetty ratkaisulle prosessikaavio.



Kuva 16. Yksinkertaistettu prosessikuva hukkaenergian hyödyntämisestä

7.1 Investointikustannukset ja takaisinmaksuaika

7.1.1 Investointikustannukset

Taulukossa 20 on eritelty laitteille hinnat ja laskettu investointikustannus. Laitteiden hinnat sisältävät työn hinnan. Laskelmat perustuvat Haahtelan Talonrakennuksen kustannustieto-kirjaan sekä samankaltaisesta kohteesta urakoitsijan antamaan yksikköhintaluetteloon [14.]

Taulukko 18. Investointikustannukset

Komponentti	Määrä	Yks. Hinta €	Yht. €
Lämmityspatteri	4	4000	16000
Lämmönsiirrin	5	2000	10000
Säiliövaraaja	1	2000	2000
Putkisto	150	100	15000
Säätölaitteet	6	1500	9000
		Yht.	52000

7.1.2 Takaisinmaksuaika

Kuvasta 10 nähdään, että ennen investointeja maalämpöpumppu on ottanut verkosta sähkötehoa 55707 kWh ja lisäenergiaa on tarvittu 7564 kWh. Sähkötehoa on siis käytetty yhteensä 63271 kWh. Laskemisessa käytetään sähkön hintana 0,1 €/kWh, jolloin lämmitykseen on kulunut vuodessa ennen investointeja 6327 €.

Tuotantohallin lämpötehontarve on 227037 kWh kuvan 10 perusteella. Ilmanvaihdon lämmitys kulutti 124795 kWh vuodessa. Kun ilmaa esilämmitetään hukkaenergian avulla, kuluttaa ilmanvaihto lämmitysenergiaa enää vain 11243 kWh vuodessa. Säästöä syntyy siis 113552 kWh vuodessa. Käyttövettä esilämmittämällä saadaan vuodessa säästöä 14173 kWh.

Kun lämpötehontarpeesta otetaan pois syntyneet säästöt, tarvitsee maalämpöpumpun tuottaa enää 99312 kWh vuodessa. Koska hukkaenergiaa käytetään myös keruupiirin lämmittämiseen, tuotetaan lämpötehoa paremmalla hyötysuhteella kuin aikaisemmin. Laskentaan käytetään vuosihyötysuhdetta 4,7, joka saavutetaan, kun maalämpöpumpulle menevä keruupiirin neste on lämpötilaltaan 15°C. Laskelmien perusteella pumpun verkosta ottama sähköteho on investointien jälkeen 21130 kWh vuodessa. Kun sähkön hintana käytetään 0,1 €/kWh, maksaa kiinteistön lämmitys vuodessa 2113 €. Kun aikaisemmin kiinteistön lämmitykseen kului vuodessa 63271 kWh, eli 6327 €, niin investointien jälkeen kuluisi enää 2113 €. Säästöä syntyy siis vuodessa 4214 €.

Laskelmien perusteella jäähdytyskone kuluttaisi vuodessa 267648 kWh. Kun sähkön hintana käytetään 0,1 €/kWh, olisi säästö 26765 € vuodessa. Kun tähän lisätään kiinteistön lämmityksestä syntyvät säästöt, on säästö yhteensä 30980 € vuodessa (Taulukko 21).

Taulukko 19. Säästöt yhteensä

Säästöt yhteensä (€)	
Lämmityskulut	4214
Vedenjäähdytyskone	26765
Säästö	30979

On kuitenkin otettava huomioon, että kesäaikaan kaikkea hukkaenergiaa ei välttämättä saada hyödynnettyä maapiirin lämpötilarajoituksien takia, eli jäähdytyskonetta silti tarvitaan. Laskelmissa on käytetty kuukausien keskilämpötiloja, joten tuntimäärät eivät ole tarkkoja.

Takaisinmaksuaika saadaan, kun jaetaan investointikustannukset syntyneellä säästöllä. Investointikustannukset ovat 52000 € ja säästö on 30980 €, ja näiden perusteella takaisinmaksuajaksi saadaan vuosi ja 8 kk.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Maalämpö on energiatehokas ratkaisu kiinteistön lämmittämiseen. Lämmityskulut ovat varsin pienet, joten niistä on vaikeaa saada suurta säästöä aikaiseksi. Suurin säästökohde onkin jäähdytysveden jäähdytyskone, joka on myös toteutettu varsin energiatehokkaasti hyödyntämään ulkoilmaa, kun ulkoilman lämpötila on alle 10°C:ttä.

Ongelmana on, että kun energiaa saadaan varmasti talviaikaan hyödynnettyä ilmanvaihdon, sekä maalämmön keruupiirin lämmittämiseen, jäähdytetään vesi muutenkin ilmaiseksi hyödyntämällä ulkoilmaa. Kesällä taas, kun hukkaenergiaa ei saada hyödynnettyksi kuin käyttöveden lämmittämiseen, sekä rajoitetusti maapiiriin, niin veden jäähdyttämiseen käytetään sähköenergiaa.

Investointien kannattavuus riippuukin paljolti lämpökaivojen kyvystä varastoida hukkaenergiaa. Jos kaikki hukkaenergia voidaan varastoida maaperään siten,

että se ei nosta keruupiirin liuoksen lämpötilaa liian korkeaksi, niin lasketut säästöt toteutuvat. Tämän vuoksi ennen kuin päätös investointien toteutuksesta tehdään, niin tulisi suorittaa tutkimus maaperän kyvystä varastoida lämpöenergiaa.

Laskettujen säästöjen toteutuessa vuodessa säästetään noin 310 MWh energiaa, joka on rahana 31 000 €. Takaisinmaksuaika olisi tällöin alle kaksi vuotta, eli investoinnit olisivat ehdottomasti kannattavia.

LÄHTEET

1. Energiakaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki: Ympäristöministeriö. 2013. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y [viitattu 10.3.2020].
2. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva. 2013. PDF-dokumentti. Helsinki: Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf [viitattu 20.1.2020].
3. Liedes, R. Rakennusten energiatehokkuus. 2. painos. Espoo: Sähköinfo Oy. 2017.
4. Seppänen, O. Rakennusten lämmitys. 2. painos. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry. 2001.
5. Grant Instruments. Loggeri SQ2010. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.grantinstruments.com/data-acquisition/squirrel-loggers/sq2010> [viitattu 10.2.2020]
6. Energiakauppa. Pakkasneste. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.energiakauppa.com/Paisunta-astia/Pakkasneste> [Viitattu 21.2.2020]
7. Kronqvist J. Projektimyyntipäällikkö. Sähköpostiviesti 20.2.2020. Nibe Oy.
8. Pihlanen N. Suunnittelupäällikkö Puhelinkeskustelu 21.2.2020. Rototec Oy.
9. Vonka M. Esimies. Haastattelu 12.2.2020. Loval Oy.
10. Ilmatieteenlaitos. Energialaskennan testivuodet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky> [viitattu 25.2.2020].
11. Motiva. Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian_kaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi [viitattu 26.2.2020].
12. Energiateollisuus. Rakennusten kaukolämmitys. Helsinki: Energiateollisuus ry. 2014.

13. THL. Legionella. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/infektiotaudit-ja-rokotukset/taudit-ja-torjunta/taudit-ja-taudinaiheuttajat-a-o/legionella> [viitattu 13.3.2020].
14. Haahtela, Y. Talonrakennuksen kustannustieto. Helsinki: Haahtela-kehitys Oy. 2015.
15. Energy from waste A guide to the debate. Lontoo: Department for environment, food and rural affairs. 2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf [viitattu 14.5.2020]

Pikajäähdytyskertojen tehot

Pikajäähdytys 1	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	33,6	40,2	6,5	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	227,9088					

Pikajäähdytys 2	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	36,0	40,6	4,6	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	160,55					

Pikajäähdytys 3	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	34,7	39,1	4,5	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	156,2708					

Pikajäähdytys 4	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	34,6	38,8	4,3	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	150,1957116					

Pikajäähdytys 5	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	36,8	41,4	4,6	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	162,1851					

Pikajäähdytys 6	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	34,3	38,8	4,5	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	158,5655806					

Pikajäähdytys 7	B1 (°C)	B2 (°C)	Δt (°C)	Virtaama (m ³ /s)	C_p (kJ/kgK)	Tiheys (kg/m ³)
KA	34,6	39,6	5,0	0,00833	4,2	1000
Teho (kW)=	174,23028					

Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden käyttämä energia

3TK1	$\eta(\%)$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$t_u(^{\circ}\text{C})$	$t_{LTO(^{\circ}\text{C})}$	$t_s(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{kJ}/\text{kgK})$	$\phi(\text{kW})$	$t(\text{h})$	$Q(\text{kWh})$
Tammikuu	82,30	22,00	-4,00	17,40	20,00	4,80	1,20	1,00	14,99	744,00	11150,71
Helmikuu	82,30	22,00	-4,50	17,31	20,00	4,80	1,20	1,00	15,50	672,00	10414,17
Maaliskuu	82,30	22,00	-2,60	17,65	20,00	4,80	1,20	1,00	13,56	744,00	10088,78
Huhtikuu	82,30	22,00	4,50	18,90	20,00	4,80	1,20	1,00	6,32	720,00	4551,55
Toukokuu	82,30	22,00	10,80	20,02	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Kesäkuu	82,30	22,00	14,20	20,62	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Heinäkuu	82,30	22,00	17,30	21,17	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Elokuu	82,30	22,00	16,10	20,96	20,00	4,80	1,20	1,00	-	-	-
Syyskuu	82,30	22,00	10,50	19,96	20,00	4,80	1,20	1,00	0,20	720,00	147,23
Lokakuu	82,30	22,00	6,20	19,20	20,00	4,80	1,20	1,00	4,59	744,00	3413,78
Marraskuu	82,30	22,00	0,50	18,19	20,00	4,80	1,20	1,00	10,40	720,00	7487,77
Joulukuu	82,30	22,00	-2,20	17,72	20,00	4,80	1,20	1,00	13,15	744,00	9785,37
									yht.		57039,37

3TK2	$\eta(\%)$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$t_u(^{\circ}\text{C})$	$t_{LTO(^{\circ}\text{C})}$	$t_s(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{kJ}/\text{kgK})$	$\phi(\text{kW})$	$t(\text{h})$	$Q(\text{kWh})$
Tammikuu	62,10	22,00	-4,00	12,15	20,00	0,90	1,20	1,00	8,48	744,00	6310,85
Helmikuu	62,10	22,00	-4,50	11,96	20,00	0,90	1,20	1,00	8,69	672,00	5837,65
Maaliskuu	62,10	22,00	-2,60	12,68	20,00	0,90	1,20	1,00	7,91	744,00	5884,50
Huhtikuu	62,10	22,00	4,50	15,37	20,00	0,90	1,20	1,00	5,00	720,00	3602,23
Toukokuu	62,10	22,00	10,80	17,76	20,00	0,90	1,20	1,00	2,42	744,00	1803,74
Kesäkuu	62,10	22,00	14,20	19,04	20,00	0,90	1,20	1,00	1,03	720,00	743,54
Heinäkuu	62,10	22,00	17,30	20,22	20,00	0,90	1,20	1,00	-	744,00	-
Elokuu	62,10	22,00	16,10	19,76	20,00	0,90	1,20	1,00	0,25	744,00	189,71
Syyskuu	62,10	22,00	10,50	17,64	20,00	0,90	1,20	1,00	2,55	720,00	1833,97
Lokakuu	62,10	22,00	6,20	16,01	20,00	0,90	1,20	1,00	4,31	744,00	3204,60
Marraskuu	62,10	22,00	0,50	13,85	20,00	0,90	1,20	1,00	6,64	720,00	4781,07
Joulukuu	62,10	22,00	-2,20	12,83	20,00	0,90	1,20	1,00	7,75	744,00	5762,68
									yht.		39954,55

3TK3	$\eta(\%)$	$t_p(^{\circ}\text{C})$	$t_u(^{\circ}\text{C})$	$t_{LTO(^{\circ}\text{C})}$	$t_s(^{\circ}\text{C})$	$q_v(\text{m}^3/\text{s})$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{kJ}/\text{kgK})$	$\phi(\text{kW})$	$t(\text{h})$	$Q(\text{kWh})$
Tammikuu	83,80	22,00	-4,00	17,79	20,00	1,50	1,20	1,00	3,98	744,00	2962,31
Helmikuu	83,80	22,00	-4,50	17,71	20,00	1,50	1,20	1,00	4,13	672,00	2773,61
Maaliskuu	83,80	22,00	-2,60	18,01	20,00	1,50	1,20	1,00	3,57	744,00	2658,58
Huhtikuu	83,80	22,00	4,50	19,17	20,00	1,50	1,20	1,00	1,50	720,00	1082,16
Toukokuu	83,80	22,00	10,80	20,19	20,00	1,50	1,20	1,00	-	744,00	-
Kesäkuu	83,80	22,00	14,20	20,74	20,00	1,50	1,20	1,00	-	720,00	-
Heinäkuu	83,80	22,00	17,30	21,24	20,00	1,50	1,20	1,00	-	744,00	-
Elokuu	83,80	22,00	16,10	21,04	20,00	1,50	1,20	1,00	-	744,00	-
Syyskuu	83,80	22,00	10,50	20,14	20,00	1,50	1,20	1,00	-	720,00	-
Lokakuu	83,80	22,00	6,20	19,44	20,00	1,50	1,20	1,00	1,01	744,00	749,42
Marraskuu	83,80	22,00	0,50	18,52	20,00	1,50	1,20	1,00	2,67	720,00	1921,97
Joulukuu	83,80	22,00	-2,20	18,08	20,00	1,50	1,20	1,00	3,46	744,00	2571,80
									yht.		14719,85

[illegible]

Ilmanvaihdon käyttämä lämmitysenergia esilämmityksen kanssa

Prosessikaavio hukkaenergian hyödyntämisestä

